

## 斜交軸インボリュートウォームギヤに関する研究

著者	広川 純夫
号	638
発行年	1982
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11587">http://hdl.handle.net/10097/11587</a>

氏 名 ひろ かわ すみ お 広 川 純 夫

授 与 学 位 工 学 博 士

学 位 授 与 年 月 日 昭 和 58 年 1 月 12 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 42 年 3 月

山形大学工学部精密工学科卒業

学 位 論 文 題 目 斜 交 軸 イン ボ リ ュ ー ト ウ ォ ー ム ギ ヤ に 関 す る 研 究

論 文 審 査 委 員 東 北 大 学 教 授 酒 井 高 男 東 北 大 学 教 授 戸 部 俊 美

東 北 大 学 教 授 槌 川 武 男

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、かみあい性能のすぐれた円筒ウォームギヤを得ることを目的として、あえて斜交軸を採用した場合に生ずる諸問題の解明に特徴をおく斜交軸インボリュートウォームギヤに関する研究について記したものである。

一般に、ウォームギヤは、円筒ウォームギヤと鼓形ウォームギヤに大別される。円筒ウォームギヤは、鼓形のそれに比較して、歯形論的扱いが容易だけでなく、加工や組立がはるかに容易で、したがって精度も出しやすく、しかも、運転中におけるウォームの軸方向の変位を無視できる等の利点がある。

一方、両ウォームギヤを、かみあい性能から比較するとき、鼓形ウォームギヤのかみあいの方が円筒ウォームギヤのそれよりすぐれているとされている<sup>(1)</sup>。それは、ウォームギヤの性能に重要な影響をおよぼすと考えられている諸因子、すなわち歯面間の相対曲率、接触線と相対速度方向とのなす角いわゆるすべり角、および同時かみあい歯数、等の諸性質が、円筒ウォームギヤにくらべて格段にすぐれているからである。

両ウォームギヤにおいて、上記かみあい諸性質が大幅に異なる直接の理由は、これら両者のウォーム歯面の形状が異なるためであるが、その詳細は最近まであまり明確にされてはいなかった。

このような事情のもとに、酒井・牧は、特にウォームギヤにつきまとう食違軸歯車の二度接触に関する研究<sup>(2)</sup>を行ない、酒井の媒介歯車理論<sup>(3)</sup>を実際問題に適用しながら、とりわけウォームギヤ

に関する理解の困難さを克服しつつ現在に至っている。こうして、従来、経験的試行錯誤のまま実用に供されていたヒンドレータイプ鼓形ウォームギヤは、次第にその姿を明らかにされ、さらに理論の発展とともに新しい鼓形ウォームギヤが、つぎつぎに開発されつつある状況にある<sup>(4)~(6)</sup>。

一方、これら鼓形ウォームギヤに関する一連の研究にもかかわらず、実用的見地にたつとき、さきに述べた円筒ウォームギヤの優位性を無視することはできない。

筆者は、円筒ウォームギヤの諸長所をそのまま保ちつつ、しかも、かみあい性質のすぐれたウォームギヤを得ることを目的にして、直交軸にこだわらず、斜交軸をもあえて採用したところに特徴をおく円筒ウォームギヤに関する研究を行なってきた。鼓形ウォームギヤの採用が、円筒形から鼓形へのウォーム歯面の形状変化によるウォームギヤの性能改善であるとするならば、筆者が行なった斜交軸機構の採用は、ウォームとホイールの間の相対速度のベクトル場を積極的に変えることにより、性能の改善をはかることを目的としている。

ところで、一貫した理論に基づいて、設計・製作・性能試験を行ない、性能のよい斜交軸ウォームギヤを得ようとする研究は、筆者の知るかぎり、ほとんど見あたらない。わずかに、BUCKINGHAM 著「Analytical Mechanics of Gears」<sup>(7)</sup>や W. LINDNER 著「Zahnräder」<sup>(8)</sup>等に斜交軸ウォームギヤの図と簡単な解説を見る程度である。この理由としては、直交軸ウォームギヤのかみあいが、ホイール軸に垂直な各断面で、ラック（ウォーム）とピニオン（ホイール）のかみあいとみなせるのに対し、斜交軸の場合には、このような断面が存在しないため、理論的扱いが格段に困難になるのがその理由の一つであると考えられる。

本論文は、斜交軸インボリュートウォームギヤのかみあい性質を明確にし、性能のよい円筒ウォームギヤを得るに至る過程を記したものであって、全文5章からなる。

第1章では、接触線の軌跡面形状からみた斜交軸インボリュートウォームギヤの特異性について行なった考察について述べている。

直交軸ウォームギヤの場合、いわゆるピッチ直線が接触線の軌跡面（以後、単に軌跡面とよぶ）上にのる。このような場合には、性能に影響をおよぼすかみあい諸性質の大幅な向上は期待できないことを明らかにした。ついで、斜交軸機構を採用して、ウォームに対するホイールの相対速度のベクトル場を変化させた場合、軌跡面形状がどのように変わるかを調べた。そのために、筆者は、まず斜交軸インボリュートウォームギヤの軌跡面の空間像を、軌跡面の中央断面曲線（両歯車軸の共通垂線を含み、ウォーム軸に垂直な平面と軌跡面との交線）を用いて表現した。そして、この軌跡面は線織面からなりたつこと、また、この曲面は線織母線以外に二本の直線を含むことが明らかにされた。筆者は、そのうちの一本をピッチ直線と名づけ、このピッチ直線を用いて軌跡面の空間像を表現した。ついで、軸角のとり方により、軌跡面の中央断面曲線の形状やピッチ直線の位置が変化し、軌跡面の形状が大幅に変化することを示した。

各瞬間の接触線は、ウォーム歯面と軌跡面との交線であることから、ウォームギヤの軌跡面の現われ方は、性能に大きな影響をおよぼす。よって、軌跡面形状の大幅な変化を可能にする斜交軸機構の採用は、この方面からする期待を増すものであると説明している。

第2章では、ウォームを創成する工具が媒介歯車運動をする場合について述べている。

酒井らの報告によれば、媒介歯車歯面で歯車(I)を創成し、つぎにこの歯車(I)の歯面を刃物歯面として歯車(II)の歯面を創成するならば、このときできあがる歯車(II)の歯面は、媒介歯車歯面によって包絡される歯車(II)第1歯面に歯車(II)第2歯面とよばれる歯面が限界法線点曲線にそってなめらかにつながった形になり、歯車(I)と歯車(II)第2歯面は、小さな相対曲率をもって接触する<sup>(2)</sup>。

ところで、斜交軸インボリュートウォームギヤにおいて、ウォームの歯面であるインボリュートヘリコイドを創成する工具の運動を、両歯車軸の共通垂線に直交するある軸に垂直に取付けられた平面のその軸方向の運動とみなすことができる。このとき、この平面は、その法線軸まわりの回転は無視できるので、軸方向に任意の換算ピッチによってねじ運動をしていると考えることもできる。したがって、ウォームの設計のいかんによっては、このウォームは酒井の媒介歯車<sup>(3)</sup>によって創成されたものとみなし得る場合がある。

本章では、上述したように、媒介歯車軸に垂直な平面を歯面とする媒介歯車によって創成されたウォームと、それとかみあう相手ホイールとからなる斜交軸インボリュートウォームギヤを提案し、解析を行なった。そして、この加工法にしたがった場合、インボリュートウォームの基本的諸元である基礎円筒半径と基礎円筒上進み角との間に特別の関係が成立すべきことを指摘し、設計上必要な諸関係式を誘導した。さらに、この場合の軌跡面の特徴を詳細に検討し、これにより、接触線と相対速度方向とのなす角を $90^\circ$ に近づけ得ることを明らかにしている。

第3章では、斜交軸インボリュートウォームギヤの接触形態について考察している。

ここで扱う接触形態とは、ウォーム歯面上の接触線群が包絡線をつくるか否か、接触線の現われないウォーム無効歯面部領域の大小、ウォーム歯面上の同一点が相手ホイール面と二度接触をするか否か、おいこしの接触とすれちがいの接触の区別、等を意味する。これら接触形態は、ウォームギヤのなじみや潤滑と密接なかかわりをもつものと考えられている。

筆者は、斜交軸インボリュートウォームギヤの接触形態を、軌跡面の中央断面曲線を用いて直感的に把握できることを示し、解析を行なった。軌跡面の中央断面曲線は、一般に基礎円筒に接触しないか、あるいは接触するとすれば二点にて接触することを説明し、これらの相異と上記歯面間の接触形態との関係を明らかにした。設計のいかんによっては、中央断面曲線が、両歯車軸の共通垂線上のただ一点で基礎円筒に接触する場合がある。これは、ウォームを創成する工具が媒介歯車運動をする場合に対応する。これらのことを明らかにした。

上述のごとく、本章の内容は、軌跡面の中央断面曲線を用いて歯面間の接触形態を直感的に把握する方法を示したものであって、これにより斜交軸機構を採用する場合、接触形態を自由にコントロールし得ることを明らかにしている。

第4章では、斜交軸インボリュートウォームギヤの効率について考察している。

筆者は、食違軸歯車の効率計算式として、両歯面が軌跡面上のある点でかみあっているとして、その点での瞬間的な効率、および軌跡面上に歯車のかみあいを代表する曲線(この曲線をかみあい線とよぶことにする)を与え、かみあいがこの曲線にそって行なわれるとみなして、一歯のかみあいが開始されてから終了するまでの間の平均的な効率を求めるための各計算式を誘導した。そして、

これらの式を斜交軸インボリュートウォームギヤに適用し、このウォームギヤの効率について考察を行なった。

ついで、本斜交軸ウォームギヤにおいて、ホイールを駆動車とする場合の効率について考察を進めた。そして、斜交軸機構を採用すれば、設計のいかんによっては比較的高減速比のウォームギヤであっても、そのままホイールを駆動車とする増速機として利用できることを述べている。

第5章では、斜交軸インボリュートウォームギヤの実用性、およびウォームギヤのかみあい性質が歯車の性能にどのような影響をおよぼすかを調べるために筆者が行なった実験を中心に述べている。また、斜交軸ウォームギヤを用いたいくつかの応用例についてもふれている。

まず、前章までの理論に基づき、本章の実験目的にみあうように、かみあい性質が大幅に異なる五対の斜交軸インボリュートウォームギヤを試作し、そのうちの三対を試験歯車とした。ホイール歯面の加工には、筆者の提案した簡易創成法、すなわち直線切刃舞ツールを用いたタンジェンシャル歯切り法を採用した。各試験歯車の諸元は、軸間距離 100 mm、減速比  $41/2$  を一定にして、軸角がそれぞれ  $115^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $60^\circ$  である。このうち、軸角  $60^\circ$  の試験歯車は、第2章の理論にしたがい、ウォームを創成する工具が媒介歯車運動をするように各諸元を決定したものである。

上記基本諸元を決定した後、かみあい性能を左右する諸因子、すなわち接触線の現われ方、歯面間相対曲率半径、接触線と相対速度方向とのなす角、およびホイール歯面等を数値計算によって求めるための諸式を誘導し、試作した歯車について計算を行なった。その結果、軸角  $60^\circ$  の試験歯車は、他の試験歯車に比較して歯面間相対曲率半径や接触線と相対速度方向とのなす角が格段に大きく、鼓形ウォームギヤの性質によく似ていることが示された。また、各試験歯車の歯面間の接触形態の相異を第3章の方法によって解説している。

以上、各試験歯車のかみあい諸性質が大幅に異なることを把握した後、筆者の試作した軸角可変の斜交軸ウォームギヤ性能実験装置によって性能を調べた。その結果、ウォームギヤのかみあい性質が、効率やホイール歯面の摩耗にかなりの影響をおよぼすことが明らかにされた。また、軸角  $60^\circ$  の試験歯車は、他の試験歯車に比較して効率が高く、ホイール歯面の摩耗も少ないことが確認された。

ついで、実験結果を潤滑の立場から考察するために、斜交軸ウォームギヤのかみあいを回転する円板と円筒の接触モデルに置換えるための諸式を誘導し、このモデル実験により、接触線と相対速度方向とのなす角と摩擦係数のかかわりを調べ、各試験歯車の潤滑性能について検討を加えた。

本章の最後に、斜交軸ウォームギヤを用いた応用例として、ホイールを駆動車とする増速ウォームギヤ、入・出力軸が平行な二段減速機（減速比 600）、および斜交軸ウォームギヤドモータ等の試作例をあげている。

以上を要約すれば、本論文は、斜交軸機構を採用することにより、円筒ウォームギヤの長所を保ち、かつ性能的には鼓形ウォームギヤに匹敵する歯車が得られることを、理論と実験の両面より、一貫した工学的観点にたって論じたものである。

最後に、本研究の機会を与えられ、長期にわたってたえず御指導と御鞭撻を賜った東北大学工学部酒井高男教授に厚く感謝の意を表する。

また、研究を進めるにあたり、懇切な討論と御助言を頂いた関東学院大学工学部 牧充助教授に厚く感謝する。

研究をまとめるにあたっては、東北大学工学部 戸部俊美教授、槌川武男教授に有益な御助言と御教示を賜った。ここに厚く感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- (1) 石川, ウォームギヤの研究と設計 最新機械設計編, 養賢堂(昭53-2)
- (2) 酒井・牧, 食違軸歯車の二度接触に関する考察  
日本機械学会論文集, 38-311(昭47-7)
- (3) 酒井, ハイポイド歯車における特異性  
日本機械学会論文集, 21-102(昭30)
- (4) 酒井・牧, 可展歯面鼓形ウォームギヤに関する研究  
日本機械学会論文集, 41-351(昭50-11)
- (5) 酒井・牧, すべり率一定の鼓形ウォームギヤに関する研究  
日本機械学会論文集, 43-366(昭52-2)
- (6) 田村・酒井・牧, 媒介歯車歯面に円すい面をもつ鼓形ウォームギヤに関する研究(第1報)  
日本機械学会論文集, 46-402(昭55-2)
- (7) BUCKINGHAM, Analytical Mechanics of Gears
- (8) LINDNER, Zahnräder, Springer-Verlag(1975)

## 審 査 結 果 の 要 旨

食違い軸歯車の中ではウォームギヤ、ウォームギヤの中では円筒ウォームギヤ、さらにその中ではインボリュートウォームギヤが最も多用されている。その主な理由は製作の容易さにある。また直交軸の場合は理論的扱いも容易である。しかし、歯面強さや潤滑性能の点では、鼓形ウォームギヤにくらべて不利である。

本論文は、従来ウォームギヤといえば当然のこととしていた軸角  $90^\circ$  という制限をはずし、あえて斜交軸を採用することによって製作容易なインボリュートウォームギヤに対し、さらにかみあい性能の向上をも与えることを目的として行った一連の研究成果をまとめたもので、本文5章よりなる。

まず緒論にて本研究着手の由来を述べその目的を明確にしたのち、第1章では、接触線の軌跡面形状からみた斜交軸インボリュートウォームギヤの特徴について論じている。すなわち、斜交軸の採用によって接触線の軌跡面形状は大幅に変わりうることを示し、これによって期待されるかみあい性能向上の可能性につき論じている。これは著者による独創的な着眼である。

第2章では、ウォームを創成する工具が媒介歯車運動をする場合について述べている。これは従来の歯切法がウォームを基準にしたいわゆる直接創成法の立場に立つのに反し、ホイールとの関係においてウォーム形状を決定するといういわゆる間接創成法の立場に立つことに当り、この手法による各種利点を述べ、工業上有用な諸関係式を導いている。

第3章では、歯面間の接触形態につき、とくにウォーム歯面無効部の大小、二度接触の有無、おこし接触とすれちがい接触の区別など、主として歯面のなじみや潤滑と密接な関係をもつ諸事項について論じている。

第4章では、まず一般の食違い軸歯車の効率につき、接触線の軌跡面上にかみあいを代表する曲線を設定し、これにそっての効率計算より総合効率を推定する方法を提案し、これを著者のウォームギヤに適用して各軸角に対する効率につき検討している。

第5章は、著者の研究成果を実験によって確認すべく行った性能試験についての記述であって、その応用としての入出力軸が平行で減速比600なる二段減速機あるいはギヤドモータ等は、本研究の実用性を明示している。

以上要するに本論文は、あえて斜交軸を採用することによって製作上の優位を保ちつつ、さらに鼓形ウォームギヤに匹敵する性能をインボリュートウォームギヤに付与することを目的として行った一連の研究成果をまとめたもので、歯車工学ならびに精密工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。